

بهره‌گیری از خواص مکانیکی سطوح در توسعه‌ی پوشش‌های غیر سمی ضد رسوب‌های دریایی

^۱ شهرام جانباز، ^۲ محمدرضا نگهداری، ^۳ اسماعیل شفیعی‌زاده، ^۴ عطا... قره‌چاهی

^۱ عضو هیات علمی گروه مهندسی کشتی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

^۲ عضو هیات علمی گروه مهندسی کشتی سازی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

چکیده

در این مقاله روش‌های دوست‌دار محیط زیست به جهت جلوگیری و کاهش تشکیل رسوبات دریایی بر بدنه تجهیزات شناور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بهره‌گیری از خاصیت سطوح آب‌گریز به عنوان راه‌کاری مناسب در جهت ایجاد پوشش‌های ضد رسوب راه حل مناسبی برای جلوگیری از تشکیل رسوبات دریایی در بدنه تجهیزات شناور در دریا می‌باشد. این پوشش‌ها غیر سمی بوده و با استفاده از خواص شیمیایی و خواص مکانیکی حاصل از چین خوردگی‌های سطح پوشش باعث تقویت خاصیت خود پاک‌شوندگی سطوح می‌گردند. در این راستا بهره‌گیری از روش ایجاد چین و چروک در مواد الاستومری بر پایه کمانش در لایه‌ی نازک قرارداده شده بر روی بستر از پیش کشیده شده راه حلی مناسب برای تولید سطوح ضد رسوب‌های دریایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سطوح ضد رسوب، سطوح خود پاک شونده، رسوب دریایی، چروکیدگی سطح

۱- مقدمه

استفاده از پوشش‌های سمی در بدنه تجهیزات دریایی متداول‌ترین روش به جهت جلوگیری از تشکیل رسوب‌های دریایی (شکل ۱) در سطح بدنه تجهیزات شناور می‌باشد. با وجود استفاده از پوشش‌های ضد رسوب متداول سالیانه مبالغ هنگفتی برای احیای پوشش‌های مذکور هزینه می‌شود، به صورتی که بر مبنای یک تحقیق تنها در ایالات متحده آمریکا هزینه رسوب زدایی و ترمیم پوشش شناورهای نظامی در سال ۲۰۱۱ مبلغی مابین ۱۸۰ تا ۲۶۰ میلیون دلار پیش‌بینی شده است. همچنین ایجاد لایه رسوب بر بدنه شناورها می‌تواند حداکثر ۱۰ درصد از سرعت آن کاسته و باعث افزایش ۴۰ درصدی مصرف سوخت شود [2,1]. علاوه بر این، پوشش‌های اولیه مرسوم غالباً بصورت پوشش‌های حاوی مواد کشنده^۱ با محتویات قلع و مس استفاده می‌شد. اما اثرات مخرب استفاده از این پوشش‌ها باعث تصویب قوانین با هدف افزایش فشار و محدودیت در استفاده از پوشش‌های حاوی مس و ممنوعیت استفاده از رنگهای تری‌بوتیل کاپلیمیر^۲ گردید [1]. با هدف حل معضلات موجود دانشمندان به دنبال بهره‌گیری از پوشش‌های پلیمری غیر سمی گام‌هایی برداشته‌اند. در این راستا دو هدف ضد رسوب بودن (ممانعت اولیه از تشکیل رسوب) و قابلیت پاک‌شوندگی آسان (کاهش چسبندگی رسوبات) مورد تأکید قرار گرفته‌اند که در نتیجه آن ارگانیزم‌های تشکیل دهنده رسوب زنده مانده و هیچ مواد سمی به طبیعت وارد نخواهد شد.

پرمکاربردترین پوشش‌های غیر سمی ضد رسوب‌های دریایی بر پایه‌ی پاک شوندگی^۳ ساخته شده از الاستومرهای پلی دایمتیل سیلوکسین^۴ می‌باشند [1]. اما عیب اصلی این پلیمرها چسبندگی ضعیف میان پوشش پلیمری با سطح زیرین و خواص مکانیکی ضعیف آنها می‌باشد. از جمله راه‌های تقویت این پلیمرها افزودن نانو تیوب‌های کربن و مواد طبیعی دریایی می‌باشد [3]. نکته قابل توجه این است که ارگانیزم‌های تشکیل دهنده رسوب به قابلیت خیس شوندگی سطوح حساس می‌باشند. شایان ذکر است سطوح آب‌گریز^۵ مبنای سطوح خود پاک شونده بوده و سطوح آب دوست^۶ به عنوان سطوح ضد تشکیل رسوب (ایجاد فیلم نازک آب بر روی سطح) کاربرد دارند [5,4].

دستیابی به سطوح با ترکیبی مناسب از خواص شیمیایی و مکانیکی راه‌کاری مناسب در راستای کاهش و جلوگیری از تشکیل رسوبات دریایی می‌باشد. در این راستا توصیه خاصیت آب‌گریزی سطوح به عنوان راه حلی مناسب یکی از خواسته‌های محققین در زمینه حل مشکل تشکیل رسوب‌ها و ارگانیزم‌های دریایی در تجهیزات شناور می‌باشد.

¹ biocidal coatings

² tributylene copolymer paints

³ fouling release coatings

⁴ poly dimethyl siloxane (PDMS) elastomers

⁵ hydrophobic

⁶ hydrophilic



شکل (۱) رسوب دریایی تشکیل شده بر روی بدنه شناورها [6].

۲- خیس شوندگی سطوح

قابلیت خیس شوندگی سطوح بر اساس چگونگی تماس یک مایع با سطح جامد و بر اساس خواص شیمیایی و عوارض سطح قابل توصیف می‌باشد. بررسی خیس شوندگی سطوح در طبیعت و سطح بدن موجودات زنده باعث بروز نتایج بسیار سودمند و یافتن الگوهایی برای توسعه دانش تولید سطوح با قابلیت‌های ویژه می‌باشد.

در حدود ۲۰۰ سال پیش یک فیزیکدان انگلیسی به نام توماس یانگ^۱ نیروهای وارد بر یک قطره آب تشکیل شده بر روی سطح را توصیف نمود. بر این اساس زاویه q تحت عنوان زاویه تماس بر اساس انرژی موجود میان وجوه مشترک جامد و مایع (g_{SL})، جامد و بخار (g_{SV}) و مایع و بخار (g_{LV}) به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$\cos(q) = \frac{g_{SV} - g_{SL}}{g_{LV}} \quad (۱)$$

رابطه ساده فوق تنها برای سطوح صاف با خواص شیمیایی همگن که در مقابل نیروهای خارجی و پس از تماس با آب خواص آن ثابت می‌ماند کاربرد دارد. بر پایه‌ی این زاویه تماس چنانچه $q > 90^\circ$ سطوح آب‌گریز و در صورتیکه $q < 90^\circ$ سطوح را آب دوست (شکل ۲) می‌نامیم. با افزایش و کاهش این زاویه به ترتیب سطوح را فوق آب‌گریز^۲ و فوق آب دوست^۳ نامیده می‌شوند. در این میان سطوح فوق آب‌گریز یا خیس نشدنی^۴ $q > 150^\circ$ بعنوان سطوح خود پاک شونده بسیار حائز اهمیت می‌باشند [5,4].

بر پایه‌ی شدت زبری سطوح دو رده‌ی مختلف برای خیس شوندگی سطوح قابل توصیف می‌باشند. در رژیم مصطلح به وزن^۵ زاویه‌ی تماس اندازه‌گیری شده q^* با زاویه تماس صحیح q متناسب با رابطه‌ی زیر تفاوت ارتباط خواهد داشت:

$$\cos(q^*) = R \cos(q) = R \frac{g_{SV} - g_{SL}}{g_{LV}} \quad (۲)$$

که ضریب R نسبت مساحت واقعی سطح زبر به مساحت ظاهری آن می‌باشد. با بازبینی رابطه‌ی (۲) دریافته می‌شود که در این رده بر پایه‌ی خواص شیمیایی بستر زیرین بر زاویه‌ی تماس افزوده و یا از آن کاسته می‌شود. چنانچه نوع برآمدگی‌ها سطح به نوعی باشد که امکان پر شدن گودی‌های روی سطح با ذرات مایع وجود نداشته باشد (منافذ توسط هوا پر شده باشند)، خیس شوندگی در رژیم کاسیه باکستر^۶ قرار می‌گیرد. در این حالت:

$$\begin{aligned} \cos(q^*) &= -1 + f_s [\cos(q) + 1] \\ &= -1 + f_s \left[\frac{g_{SV} - g_{SL}}{g_{LV}} + 1 \right] \end{aligned} \quad (۳)$$

در رابطه‌ی (۳) f_s آن بخش از سطح زیر قطره می‌باشد که در تماس مستقیم با مایع است و بخش باقی مانده $1 - f_s$ در تماس با هوا می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه‌ی (۳) تنها در صورتیکه مایع بالای سطح قرار گرفته باشد معتبر است. در صورتیکه مایع به داخل شیار رخنه نماید معادله‌ی فرمی پیچیده‌تر به خود خواهد گرفت. به صورت کلی فرم بری سطح و خواص شیمیایی آن در فرم قطره شکل گرفته موثراند [4]. شکل‌های (۲) و (۳) نحوه تشکیل قطره آب بر روی سطوح صاف و زبر را نشان می‌دهند.

¹ Thomas Young

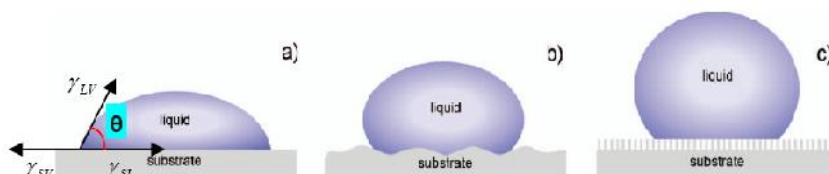
² super-hydrophobic

³ super-hydrophilic

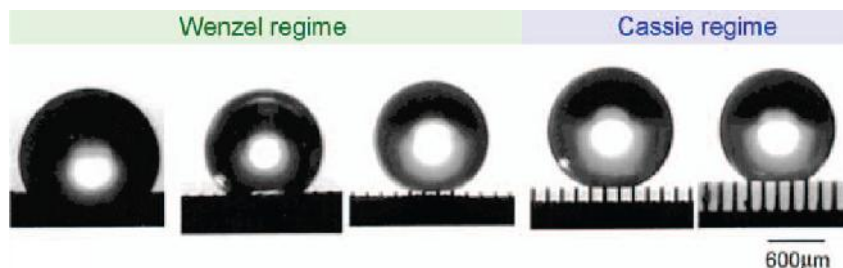
⁴ non-wettable

⁵ Wenzel regime

⁶ Cassie-Baxter



شکل (۲) تشکیل قطره آب بر روی سطوح تخت (a) و سطوح زبر (b) و (c) که در آن θ زاویه‌ی تماس نامگذاری می‌شود، متناسب با شدت زبری بستر قطره در رژیم مصطلح به ونزل (b) و کاسیه باکستر (c) قرار می‌گیرد [4].



شکل (۳) نحوه تشکیل قطره ۱ میلی گرمی بر روی سطح با زبری ستونی شکل و شدت زبری (R) متغییر در دو رژیم ونزل و کاسیه باکستر [4].

۳- الگوهای طبیعی زبری در سطوح آب‌گریز

دانشمندان و محققین همواره با الهام‌گیری از عالم طبیعت بر پایه‌ی ترکیب خواص شیمیایی و بافت مواد اعم از اجسام زنده و غیر زنده موفق به ایجاد خواص مطلوب در مصنوعات ساخت بشر شده‌اند. به عنوان مثال چشم بید (شکل ۴a) که سطح آن دارای ساختاری ستونی با ارتفاع هر ستون ۲۰۰ نانومتر همانند یک سیاه چاله قابلیت جذب هرگونه نور ضعیف را دارا می‌باشد. این قابلیت می‌تواند به عنوان الگویی برای ایجاد سطوح ضد بازتاب نور موثر واقع شود. بعنوان نمونه‌ای دیگر، در گونه‌ای پروانه رنگین رنگ بال‌ها نشأت گرفته از رنگدانه‌های موجود در بال‌ها می‌باشد (شکل ۴b). در بال‌های این پروانه برخی از رنگ‌ها بواسطه‌ی ترکیبی از رنگدانه‌ها و بر اساس سازماندهی مخصوصی بوجود می‌آیند. چنین قابلیتی به پروانه توانایی ایجاد رنگ‌های متنوع و استتار را می‌بخشد.

چنانچه به ساختار پاهای نوعی مارمولک به نام جکوس^۱ توجه شود (شکل ۴c)، می‌توان دریافت که وجود صدها هزار مو^۲ هماهنگ با صدها بالشتک^۳ با سایز کمتر از میکرون در نوک هر تار به این موجود قابلیت راه رفتن بر روی سطوح صیقلی دیوارها و سقف را می‌دهد. پاها بنا بر نیروهای ساده ون در والسی متاثر از ایجاد خلاء به دیوارها می‌چسبند و به این جانور توانایی حرکت سریع و چسبیدن پاها به سطوح در کسری از ثانیه را می‌بخشند.

با افزایش زبری سطح قابلیت چسبندگی پاهای جکوس به سطح افزایش می‌یابد، اما متناسب با هدف کاهش چسبندگی سطوح در این مقاله در موارد متعددی با افزایش زبری سطح میزان چسبندگی به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. بعنوان مثال سطح بدن بسیاری از ماهی‌ها و خزندگان همواره عاری از هرگونه آلودگی می‌باشد. خصوصیات سطح بال و پاهای برخی حشرات به آنها توانایی جلوگیری از خیس شدن را می‌بخشد. بر این پایه می‌توان استدلال کرد که چرا حشره‌ی واتراسترایدر^۴ توانایی گام برداشتن بر روی سطح آب را دارد (شکل ۴d). در این حشره خاصیت آب‌گریزی بسیار بالا به همراه نظم خاص موهای بسیار ریز روی پاها توانایی تحمل وزن زیادی را به هر پا می‌دهد.

اما بهترین و شناخته‌شده‌ترین نمونه برای توصیف آب‌گریزی در طبیعت برگ گیاهانی مشخص می‌باشد. از مهمترین مزایای برگ‌ها با سطوح دفع‌کننده‌ی آب جلوگیری از رشد و نمو باکتری‌ها و هاگ قارچ‌ها بر روی سطح برگ می‌باشد. همچنین این خاصیت از افزایش دمای برگ و صدمات ناشی از ته‌نشینی نمک‌ها جلوگیری می‌کند. یکی از موارد بسیار مطرح در این زمینه برگ گیاه نیلوفر آبی^۵ می‌باشد. شکل بافت خاص سطح فوقانی این برگ، در بر گیرنده‌ی اجزای محدب (شکل ۴e)، باعث ایجاد خاصیت خود تمیز شوندگی در این برگ می‌باشد [4].

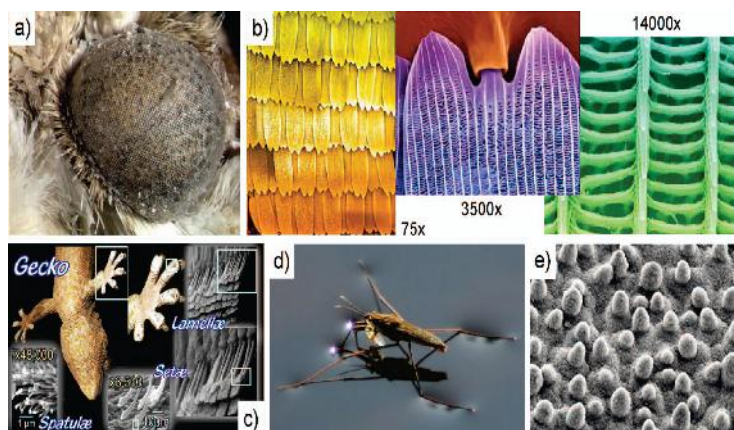
¹ geckos

² setae

³ spatulae

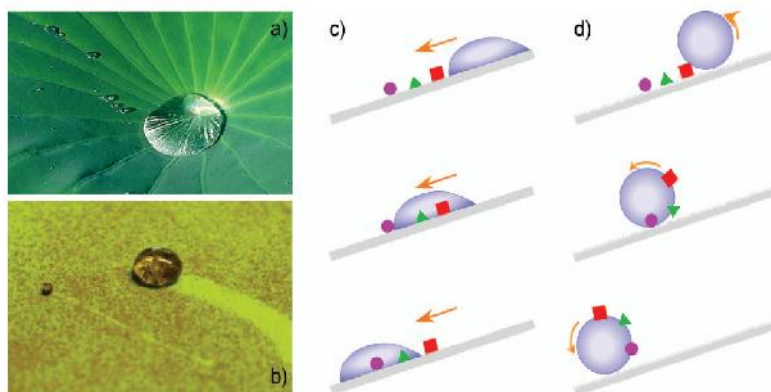
⁴ water-strider

⁵ Lotus leaf



شکل (۴) a- سطح چشم بید، b- سطح بال پروانه متشکل از صدها هزارقطعه با ساختار بسیار پیچیده با مقیاس‌های مختلف، c مشخصات سطح کف پای جکو، d- حرکت واتراسترایدر بر روی سطح آب، e- مشخصات سطح برگ گیاه نیلوفر آبی در مقیاس نانو[4].

همانند سایر گیاهان دفع کننده آب، قطرات آب عامل تمیز کننده‌ی سطح برگ نیلوفر آبی می‌باشند (شکل ۵). برای این منظور می‌بایست چسبندگی آلودگیها بر روی برگ کمتر از چسبندگی آنها به قطرات آب باشد که این امکان بوسیله‌ی سطح خاص این برگ تامین می‌گردد.

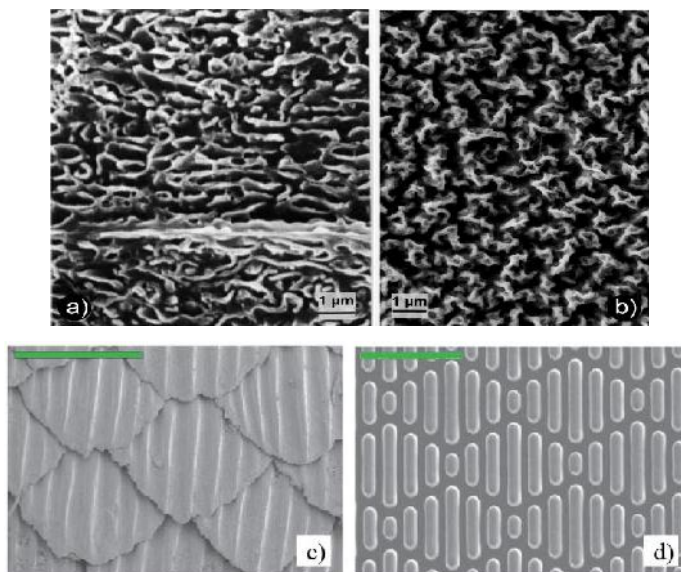


شکل (۵) a- شکل قطره آب تشکیل شده بر روی گیاه نیلوفر آبی، b- حرکت قطره آب بر روی برگ آلوده یک گیاه و پدیده لوتوس^۱، c و d- حرکت قطره‌ی آب بر روی سطح آلوده که در آن چسبندگی آلودگی‌ها و سطح ضعیف است، در صورت غلتش قطره آب بر روی سطح آلودگی را با خود حمل نموده سطح را تمیز می‌کند[4].

از جمله تلاش‌های برجسته‌ی پژوهشگران در راستای تولید سطوح ضد رسوب می‌توان به تولید سطحی با الگوگیری از پوست وال خلبان^۲ که در مقیاس نانو با استفاده از پاشش لایه به لایه یک پلی الکترولیت تولید شده است اشاره نمود[8,7]. در موردی دیگر، بر مبنای ساختار پوست کوسه سطحی ضد رسوب با استفاده از مواد پلیمری مدل‌سازی شده است (شکل ۶)[9].

¹ lotus effect

² pilot wale

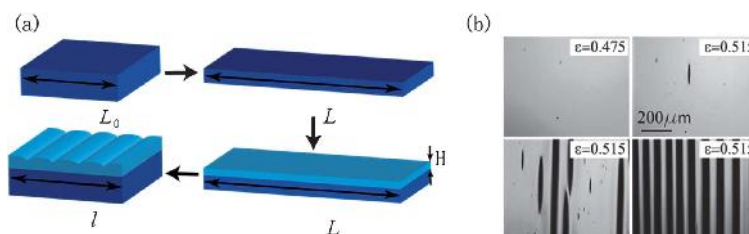


شکل (۶) a- سطح پوست وال خلبان [7]، b- بازسازی سطح پوست وال خلبان به روش پلی‌الکترولیت لایه به لایه [8]، c- دندان‌های روی پوست کوسه چانه سفید (20mm) [9]^۱، d- الگوی پلی‌دایمتیل‌سیلوکسینی پوست کوسه‌ی چانه سفید به روش فتولیتوگرافیکی (20mm) [9]^۲.

۴- ایجاد چین و چروک در سطوح الاستومری با استفاده از پدیده کمانش

یکی از مواردی که مهندسين همواره در صدد رفع و يا کاهش آن در مصنوعات کشسان می‌باشند وجود کمانش و چین خوردگی در هنگام تولید محصول می‌باشد. این معایب می‌تواند به کاهش کیفیت و پایین آمدن ضریب اطمینان محصول بیانجامد. اما استفاده از کمانش و چین خوردگی در مواد نرمی همچون الاستومرها توانسته است منجر به نتایج امیدوار کننده در راستای تولید محصولات با قابلیت‌های منحصر به فردی همچون محصولات درمانی هوشمند، سنسورها و پوشش‌های ضد رسوبات دریایی شود [10, 11].

محققین توانسته‌اند با استفاده از بهره‌گیری از کمانش لایه‌های نازک چسبانده شده بر روی بسترهای نرم گونه‌های مختلفی از چین و چروک سطح را ایجاد نمایند. با قراردادن لایه‌ای از ماده پوشش دهنده بر روی بستر الاستومری که تحت کشش اولیه قرار گرفته است و پس از آن رها کردن بستر به جهت بازگشت کشش اولیه‌ی آن بر مبنای وجود ناپایداری‌هایی در پوشش‌های بکار رفته امکان ایجاد چین و چروک سطحی با مقیاس مختلف وجود دارد. در یک کار آزمایشگاهی بر اثر کشش یک لایه ضخیم تغییر طولی از L_0 تا L ایجاد گردیده است و پس از آن یک لایه نازک الاستومری به ضخامت H بر روی آن متصل شده است. با رها کردن بستر از پیش کشیده شده مقدار کرنش فشاری طولی در لایه نازک فوقانی به صورت $e = 1 - l/L$ به وجود می‌آید (شکل ۷). در این آزمایش جنس بستر ضخیم و لایه نازک هر دو از الاستومر پلی‌دایمتیل‌سیلوکسین بوده و نتایج آزمایش حاکی از ایجاد چروکیدگی‌های موازی متناسب با کرنش فشاری بوجود آمده در لایه‌ی نازک می‌باشد [12].

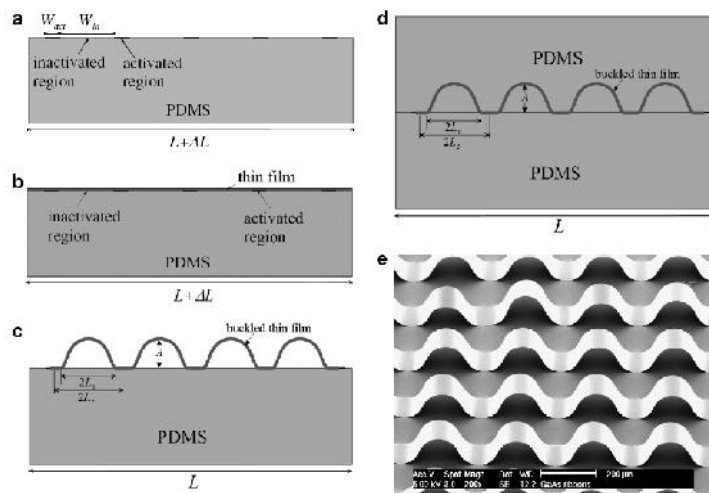


شکل (۷) a- شماتیک آزمایش ایجاد چین و چروک با استفاده از سطح از پیش کشیده شده، b- مشاهده میکروسکوپی پین خوردگی سطح برای $H = 63\text{mm}$ ، مطابق $e = 0.475$ تا خوردگی‌های مختصری در سطح بوجود آمده است که انتشار نیافته‌اند، مطابق $e = 0.515$ به صورت نشان داده شده در شکل منتهی به ایجاد سطح دارای تاخوردگی‌های موازی شده است [12].

¹ spinner shark

² photolithographic

اوج هنر مهندسی در پدید آوردن سطوح چروکیده بهره‌گیری از خلق ناپایداری‌های لازم برای دست‌یابی به سطوح با کیفیت خاص می‌باشد. در این راستا با استفاده از ایجاد نواحی فعال شده (با قابلیت ایجاد پیوند مستحکم) بر روی بستر از پیش کشیده شده‌ی الاستومری امکان ایجاد برخی چروکیدگی‌های خاص در لایه‌ی الاستومری نازک فوقانی متناسب با جنس بستر و لایه برپایه‌ی شرایط فیزیکی و نیروهای اعمالی امکان‌پذیر خواهد بود (شکل ۸).



شکل (۸) مراحل دقیق تولید کماتش در لایه نازک بر روی بستر پلی دایمتیل سیلوکسینی، a- ایجاد الگوهای فعال و غیرفعال بر روی بستر از پیش کشیده شده، W_{in} و W_{act} به ترتیب پهنای نواحی فعال و غیر فعال می‌باشند، b- نصب لایه‌های نازک هم‌جهت با کشش اولیه بستر، c- آزاد سازی بستر و ایجاد موج با دامنه‌ی A و با طول موج $2L_1$ ، فاصله‌ی $2L_2$ مجموع ناحیه‌ی فعال و غیر فعال پس از رها سازی می‌باشد، d- پاشیدن روکش محافظ پلیمر بر روی نوارهای چین‌دار شده، e- اسکن سطح بوجود آمده توسط میکروسکوپ الکترونی [13].

۵- نتیجه‌گیری

ذرات آب در تماس با سطوح متناسب با شرایط فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی موجود، بر مبنای نحوه‌ی چسبیدن به سطوح اشکال مختلف قطره را بر سطح اجسام ایجاد می‌نمایند. در شرایط همگن، بر اساس میل به خیس شدن در سطوح، زاویه‌ای مابین سطح آزاد قطره و بستر تحت عنوان زاویه‌ی تماس بوجود می‌آید. در شرایطی که این زاویه کمتر از ۹۰ درجه باشد سطوح آب دوست و در غیر اینصورت سطوح تحت عنوان آب گریز دسته بندی می‌شوند. با افزایش زاویه‌ی تماس برای زوایای بیشتر از ۱۵۰ درجه سطوح بعنوان سطوح فوق آب دوست از اهمیت بسزایی در طراحی سطوح ضد رسوب خواهند داشت. چنین سطوحی با کاهش نیروی چسبندگی رسوب‌ها به بدنه تجهیزات دریایی امکان جدایش آلودگی‌های سطحی و تقویت خود پاک‌شوندگی را دارا می‌باشند. در این راستا بهره‌گیری از الگوهای طبیعی کمک شایانی به جهت یافتن راه‌حل‌های ممکن می‌نماید. در این زمینه با مطالعه‌ی خواص شیمیایی و مکانیکی سطح پوست انواع جانوران دریایی، حشرات و گیاهان دارای پوست با قابلیت خود پاک‌شوندگی، الگوهایی مناسب در دسترس خواهند بود.

از جمله راه‌حل‌های مناسب برای دستیابی به سطوح دارای پوشش با خواص مکانیکی لازم برای خود پاک‌شوندگی استفاده از کماتش حاصل از لایه نازک پوشانده شده بر روی بسترهایی با کرنش اولیه کششی می‌باشد. جنس اینگونه بسترها و پوشش‌ها قالباً از مواد الاستومری بوده و به جهت افزایش کیفیت و قابلیت مکانیکی توسط پوشش‌های نانو و یا افزودنی‌های طبیعی قابل تقویت می‌باشند.

به صورت کلی استفاده از پوشش‌های خود پاک‌شونده به عنوان پوشش‌ها دوست‌دار طبیعت راه‌حل بسیار مناسبی برای حفاظت از محیط زیست می‌باشد. علاوه بر این با افزایش عمر این پوشش‌ها به میزان قابل توجهی از هزینه‌های معمول برای احیا پوشش‌های قدیمی در بدنه تجهیزات دریایی کاسته شده و بنا بر خاصیت این پوشش‌ها از هزینه مصرف سوخت در کشتی‌ها به میزان زیادی کاهش خواهد یافت.

۶- مراجع

- [1] Grozea, C. M.; Walker, G. C., Approaches in designing non-toxic polymer surfaces to deter marine Biofouling, *Soft Matter*, 5, 4088-4100, 2009.
- [2] Schultz, M. P., Bendick, J. A., Holm, E. R., Hertel, W. M., Economic impact of biofouling on a naval surface ship, *Biofouling*, 27, 87-98, 2011.
- [3] Beigbeder, A., Degee, P., Conlan, S. L., Mutton, R. J., Clare, A. S., Pettitt, M. E., Callow, M. E., Callow, J. A., Dubois, P., Preparation and characterisation of silicone-based coatings filled with carbon nanotubes and natural sepiolite and their application as marine fouling-release coatings, *Biofouling*, 24, 291-302, 2008.
- [4] Genzer, J., Efimenko, K., Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review,

- Biofouling, 22(5), 339 – 360, 2006.
- [5] Callow J.A., Callow M.E., Ista L.K., Lopez G., Chaudhury M.K., The influence of surface energy on the wetting behaviour of the spore adhesive of the marine alga *Ulva linza* (synonym *Enteromorpha linza*), J.R. Soc. Interface, 2, 319–325, 2005.
- [6] Yebra, D. M., Kiil, S., Dam-Johansen, K., Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings, Prog. Org. Coating, 53, 256–275, 2004.
- [7] Baum, C., Meyer, W., Stelzer, R., Fleischer, L.G., Siebers, D., Average nanorough skin surface of the pilot whale (*Globicephala melas*, Delphinidae): considerations on the self-cleaning abilities based on nanoroughness, Marine Biology, 140, 653-657, 2002.
- [8] Cao, X., Pettitt, M. E., Wode, F., Arpa Sancet, M. P., Fu, J., Ji, J., Callow, M. E., Callow, J. A., Rosenhahn, A., Grunze, M., Interaction of zoospores of the green alga *Ulva* with bioinspired micro- and nanostructured surfaces prepared by polyelectrolyte layer-by-layer self-assembly, Adv. Funct. Mater., 20, 1984-1993, 2010.
- [9] Callow, J. A., Callow, M. E., Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings, Nature Communications, 2, 244, 2011.
- [10] Xia, D., Johnson, L. M., López, G. P., Anisotropic Wetting Surfaces with One-Dimesional and Directional Structures: Fabrication Approaches, Wetting Properties and Potential Applications, Advanced Materials, 24(10), 1287–1302, 2012.
- [11] Li, B., Cao, Y. P., Feng, X. Q., Gao, H., Mechanics of morphological instabilities and surface wrinkling in soft materials: a review, Soft Matter, 8(21), 5728, 2012.
- [12] Cai, S., Chen, D., Suo, Z., Hayward, R. C., Creasing instability of elastomer films, Soft Matter, 8(5), 1301, 2012.
- [13] Jiang, H., Sun, Y., Rogers, J.A., Huang, Y., Post-buckling analysis for the precisely controlled buckling of thin film encapsulated by elastomeric substrates, International Journal of Solids and Structures, 45, 2014–2023, 2008.